539.43.013 : 624.074

円板と円筒との接合部の疲れ強さについて*

坂 本 勲**

Fatigue Strength of Joint Structures Consisting of Circular Plates and Cylindrical Shells

by Isao SAKAMOTO

This paper deals with the fatigue strength of discontinuity portions in the structures consisting of plates and shells.

In conducting this study, "A resonance type fatigue testing machine" was constructed by author's design for the fatigue test structures, and the test was carried out using three-dimensional model specimens.

As a result, the respective advantages and disadvantages of various forms of joint construction were assessed on the basis of the values of the endurance limit, and it was found that the construction having a toroidal shell midway between circular plate and cylindrical shell is superior to the construction in which a cylindrical shell is directly connected with the inner edge of a circular ring plate.

1. 緒 言

平板とかくとの接合構造物は、あらゆる分野にわたって広く用いられるものであるが、その疲れ強さに関する資料の蓄積は疲れ設計の見地からきわめて重要であると考えられる。

本研究は、試作した共振形疲れ試験機を用いて、円輪板—円筒かくおよび円輪板—円環かく—円筒かくよりなる立体模型試験片を溶接により組立て、疲れ試験を行なった結果について検討を加えたものである。

2. 試験片の材質、形状、寸法および製作方法

第1図は立体模型試験片の形状および寸法を示したもので、上部フランジ、円筒、試験対象部および円輪板からなり、これらの部品は溶接により組立てられている。試験対象部を除く部品はすべて同一の形状、寸法としたが、試験対象部は第2図に示すようにそれぞれ異なっており、R-B-W1 および R-B-W2 試験片は接合部に溶接すみ肉をもつが、溶接の程度が異なり、R-C-1 および R-C-2 試験片は円輪板と円筒との中間に円環かく部をもつ形状であるが、円環かく部と円筒との接合方法が異なっている。R-A 試験片は円輪板と円筒との接合構造を一体の素材から削成したも

のであり、接合部にすみ肉を有しない形状である。

試験片の試験対象部は板厚 60 mm の鋼板から削成し、円筒部は厚肉ガスを所定の寸法に機械加工し

第1図 立体模型試験片

第2図 立体模型試験片の接合部

* 昭和 38 年 3 月 19 日 関西支部第 38 期定時総会講演会において講演，原稿受付 昭和 38 年 6 月 17 日。

** 正員，日立造船会社技術研究所（大阪市比花区桜島北之町 60）。

た。第1表に試験片の化学成分および機械的性質を示した。第3図は材料の顕微鏡組織を示したものである。

試験対象部の溶接は特に注意して行ない、同一種類の疲れ試験片は同一条件で溶接を行ない、溶接後に650℃で熱処理ならびに溶接部の機械仕上を行なった。第2表は試験対象部の溶接条件を示したものである。

3. 疲れ試験の方法

第1図に示した立体模型試験片の疲れ試験は、筆者が試作した共振形疲れ試験機を用いて行なった。試験機本体の構造は、第4図に示すように、試験片と慣性おもりおもりからなる振動系をつり下げるための4本の支柱

と、電磁石およびその支持わくからなりたっており、全体は基礎ボルトを介して重量約10tのコンクリートの基礎に固定されている。

第2表 試験片の溶接条件

	溶接箇所	層数	棒 種	棒 径 mm	電 流 A	電 圧 V
R-B-W 1	すみ肉溶接	1	B-17	4	140~150	22~23
	突合せ溶接	1	"	3.2	100~110	"
		2	"	4	140~150	"
R-B-W 2	すみ肉溶接	1	"	"	"	"
R-C-1	突合せ溶接	1	LB55R	3.2	100~110	"
		2	B-17	4	140~150	"
R-C-2	角 溶 接	1	"	3.2	100~110	"
		2	"	4	140~150	"

第1表 試験片材料の化学成分(%)
および機械的性質

	C	Si	Mn	P	S
60 mm 板厚鋼板	0.17	0.27	0.89	0.017	0.024
厚肉ガス管	0.17	0.12	0.37	0.016	0.017

	降伏点 kg mm ²	引張強さ kg mm ²	真破断力 kg mm ²	伸 び %	絞 り %
60 mm 鋼板(圧延方向)	35.4	49.7	100.6	33.8	64.5
同上(圧延と直角方向)	32.5	46.1	80.8	37.8	55.3
同上(板厚方向)	28.9	48.2	61.6	37.3	41.9

60 mm 板厚鋼板 ×60

厚肉ガス管 ×60

第3図 試験片用材料の顕微鏡組織

第4図 試作した共振形疲れ試験機

試験片の駆動は、試験片に取付けた慣性おもりの下方に駆動コイルを取付け、コイルを一定の磁場におき、コイルに交流を通じる方式とする。ただし、コイルに通じる交流の周波数は、試験片を試験機に取付けた状態における試験機振動系の固有振動数と一致させ、いわゆる共振形とする。電磁石の励磁コイルは 2 mm ϕ のネオマル線 12 400 回巻とし、駆動コイルは 0.5 mm ϕ のネオマル線 2 200 回巻とした。第 5 図に励磁電流値と磁束密度との関係を示したが、図から明らかに励磁電流値を 4.0 A 付近に選べば、電流値の変化による磁束密度の変化はあまり大きくない。

第 6 図は試験機の駆動装置および制御装置のブロック線図を示したものである。すなわち慣性おもりの下方にとりつけられたピックアップコイルには、慣性おもりの振動速度に比例した電圧を生じ、積分回路、移相回路および減衰器を経て主増幅器に伝えられ、試験機を駆動する、いわゆる自励式になっている。また、

第 5 図 励磁電流と磁束密度の関係

第 6 図 共振形疲れ試験機のブロック線図

負荷 600 Ω , 最大出力 600 W

第 7 図 主増幅器の周波数特性

ピックアップコイルの出力を微分回路に通すことにより、慣性おもりの振動加速度に比例した電圧が得られるが、これを基準の一定電圧と比較することによって、微分回路の出力電圧が常に一定になるように主増幅器を制御し、慣性おもりの振動加速度が常に一定値を保つように振動が持続することになる。主増幅器は出力管として 4 B 13 を 4 本用いた AB 級の増幅器で、80 c/s における利得は 58 db であり、最大出力 600 W である。第 7 図は増幅器の周波数特性を示したものであるが、30~150 c/s における利得の変化はほ

第 3 表 立体模型試験片の疲れ試験速度 c/s

	試験開始時	き裂発生時	破断直前	備 考
R-A	80.5	79.5	68.0	慣性おもりの 71.76 kg
R-B-W1	84.2	83.9	76.9	同 上
R-B-W2	81.5	80.7	66.3	同 上
R-C-1	73.3	72.7	67.5	慣性おもりの 139.90 kg
R-C-2	78.2	77.7	65.6	同 上

第 8 図 駆動コイルの電流と動的張力および共振倍率係数との関係

第 9 図 微分回路出力電圧と動的荷重との関係

とんどない。制御回路はブリッジ方式としたが、その応答感度は最大荷重の 0.2% である。繰返し回数の計数装置は低位の 3 けたはデカトロン計数管を用い、高位の 4 けたは富士電機製計数装置を用いた。

第 8 図は試験機の駆動時における駆動コイルの電流

第 10 図 R 形試験片の静的荷重試験時のたわみ測定結果

第 11 図 静的荷重試験時の応力測定結果 (荷重 800 kg)

第 12 図 静的荷重試験時の応力測定結果 (試験荷重 $P=800$ kg)

値と、試験片に加えられる荷重および共振倍率係数との関係の一例を示し、第 9 図は動的検定結果を示したものである。

試作した共振形疲れ試験機に試験片をとりつけて疲れ試験を行なったが、試験速度は試験機に試験片をとりつけたときの振動系の固有振動数と一致させる訳であるが、各種試験片に対する試験速度の一例を第 3 表に示す。試験荷重の設定は試験機のピックアップコイルの誘起電圧微分回路出力電圧を基準とした。動的荷重と微分回路出力電圧との関係は、第 9 図に示した動的検定結果を用いた。共振形疲れ試験機を用いて疲れ試験を行なう場合、試験片は振動系の一部となり、試験片のたわみ曲線ならびに応力分布は静的荷重試験時と厳密には等しくならない。しかし、この実験の試験片の質量は慣性おもりの質量に比して小さく、静的荷

第 13 図 静的荷重試験時の応力測定結果 (試験荷重 $P=800$ kg)

第 14 図 静的荷重試験時の応力測定結果 (荷重 800 kg)

重試験時における荷重とたわみおよび荷重と応力との関係を, そのまま疲れ試験時に適用しても実用上さしつかえないことが検証実験により確認された. 第10図は静的荷重試験時における円輪板部の最大たわみ量の測定結果を示したものである. 第11~14図は, 各種試験片の静的荷重試験時における応力測定結果を示したものである.

4. 実験の結果および検討

4.1 試験片素材の疲れ限度 試験片用素材から採取した小野式回転曲げ(平行部の径10mm)およびシェンク形平面曲げ(板厚5mm, 板幅20mm)疲れ試験結果を第15図に示す. 試験片素材のシェンク形平面曲げ疲れ限度は, 試験対象部用鋼板では 21.5 kg/mm^2 , 円筒厚肉ガス管では 18 kg/mm^2 となり, また鋼板の圧延面に平行な面内における圧延方向およびそれと直角方向とも, 小野式回転曲げ疲れ試験による疲れ限度は 23 kg/mm^2 であり, 両者の相違は認められない.

第15図 試験片素材の疲れ試験結果

第16図 平面模型試験片

4.2 平面模型試験片の疲れ試験結果 立体模型試験片は溶接構造であるので, 疲れ強さにおよぼす溶接部の影響などを明らかにするため, 第16図に示す平面模型試験片の疲れ試験を実施した. 平面模型試験片は, 立体模型試験片の試験対象部と同一材料, すなわち60mm鋼板を用い, 溶接部は立体模型試験片の溶接部と同じ溶接条件となるように考慮して溶接を行ない, 疲れ試験は共振形繰返し曲げ疲れ試験機⁽¹⁾を用いて行なった. 第17図は平面模型試験片に曲げモーメントを加えたときの応力分布を示したものである. 第17図(a)は光弾性模型実験結果であり, (b)は電気抵抗線ひずみゲージによる測定結果である. 板厚

第17図 平面模型試験片の応力分布状況

第18図 平面模型試験片の疲れ試験結果

t , 板幅 b の平面模型試験片に曲げモーメント M が加わったときの公称曲げ応力 σ_n を次式で表わすことにする.

$$\sigma_n = \frac{6M}{bt^2}$$

第 17 図における α は, 最大応力値 $\sigma_{\max}$ と, 上式で表わされる公称曲げ応力 σ_n との比を示し, L-B および L-B-W 1 試験片では $\alpha=2.5$, L-C 試験片では $\alpha=1.43$ となる.

平面模型試験片の疲れ試験結果を第 18 図に示したが, 縦軸は公称曲げ応力 σ_n を用いて示したものである. 平面模型試験片の疲れき裂の状況を第 19 図に示したが, 疲れき裂の発生位置は, 試験片の最大応力値を示す位置と一致している.

L-B-W 1 試験片の疲れき裂の発生位置は, 溶接による熱影響部のぜい化域と一致しているが, その疲れ強さは一体の素材から削成した L-B 試験片の疲れ強

さと差が認められず, 溶接部における疲れ強さの低下は無視できることを示している. 公称曲げ応力 σ_n を用いて平面模型試験片の疲れ限度を求めると, L-B および L-B-W 1 試験片では 8.7 kg/mm^2 , L-C 試験片では 15 kg/mm^2 となる. それぞれの公称曲げ応力で示した疲れ限度に, 第 17 図に示した α の値を掛けると, L-B および L-B-W 1 試験片では 21.75 kg/mm^2 , L-C 試験片では 21.45 kg/mm^2 となり, 試験片素材の シェンク形 平面曲げ 疲れ限度 21.5 kg/mm^2 とだいたい一致する.

4.3 立体模型試験片の疲れ試験結果 立体模型試験片の疲れ試験結果を, 縦軸に円筒の軸方向荷重をとり, 横軸に繰返し回数の対象目盛をとって示すと第 20 図を得る. 10^7 回以上の荷重を繰返してもき裂を生じない荷重の上限値を, 疲れ限度とすると第 4 表のようになる. 同表の疲れ限度のたわみ表示は, 第 10 図に示した荷重とたわみとの関係を疲れ限度の荷重表示の値に適用して換算したものである. また, 疲れき裂発生点の応力状態の明らかな R-C-1 および R-C-2 試験片については, 主応力比 σ_2/σ_1 および疲れ限度に相当する大きいほうの主応力 σ_1 の値をも同表に示した.

一般に溶接部の疲れ強さは母材のそれよりも低下する⁽²⁾. しかし, 溶接の条件によりその低下の程度は大幅に相違するものと考えられる. この実験においては, 立体模型試験片および平面模型試験片における溶接は慎重な注意を払って行ない, 溶接後の焼なましお

第 4 表 立体模型試験片の疲れ限度と主応力比

	荷重表示 $P \text{ kg}$	たわみ表示 $w \text{ mm}$	主応力表示 $\sigma_1 \text{ kg/mm}^2$	主応力比 σ_2/σ_1
R-B-W 1	850	0.306		
R-B-W 2	600	0.257		
R-C-1	1 650	0.422	18.33	0.42
R-C-2	2 100	0.487	19.15	0.44

第 19 図 平面模型試験片の疲れき裂状況

第 20 図 立体模型試験片の疲れ試験結果

よび溶接部の機械仕上を実施した。平面模型試験片の疲れ試験結果により、溶接部における疲れ強さの低下は無視できることが確認されたが、これと同一素材を用い、同様な考慮を払って製作した立体模型試験片においても、溶接による疲れ強さの低下は無視できるものと考えられる。また、溶接部において疲れ破壊を生じたものにあっても、ばらつきはきわめて少なく、疲れ破壊は溶接部の影響ではなく、主として切欠き部の形状の影響が支配的であるものと推定される。

R-C-1 および R-C-2 試験片の疲れ限度は、第4表に示すようにそれぞれ 18.33 kg/mm^2 および 19.15 kg/mm^2 となり、試験片素材のシェンク形平面曲げ疲れ限度 21.5 kg/mm^2 より小さな値となっている。立体模型試験片の疲れ試験時における応力状態は二軸応力となり、主応力比 σ_2/σ_1 ($\sigma_1 > \sigma_2$) は R-C-1 試験片では 0.42, R-C-2 試験片では 0.44 であり、これらの試験片の疲れ限度が一軸応力のもとで行なわれた試験片素材の疲れ限度より小さな値を示した理由は組合せ応力の影響によるものと考えられる。

4.4 各種接合構造の疲れ強さの比較 立体模型試験片相互の疲れ強さの相違は、第20図に示したようにめいりょうに認めることができる。第21図は立

体模型試験片の疲れ破壊部の切断面を5%硝酸水溶液にてマクロ・エッチを行なって得られた肉眼組織を示したものである。R-B-W1 および R-B-W2 試験片の疲れ破壊位置は溶接部と一致しているが、R-C-1, R-C-2 および R-A 試験片は、いずれも母材に疲れ破壊を生じている。母材に疲れ破壊を生じた R-A 試験片の疲れ強さが、溶接部に疲れき裂を生じた R-B-W1 および R-B-W2 試験片の疲れ強さより低い値を示していることから、立体模型試験片の疲れ強さにおける溶接の影響は無視できることがうかがわれ、円輪板と円筒とが直接接合する構造において、すみ肉をつけることにより疲れ強さは向上することがわかる。

R-C-1 および R-C-2 試験片は、円輪板と円筒との中間に円環かく部をもつ構造であるが、これらの試験片の疲れ強さは、円輪板と円筒とが直接接合する構造の各試験片の疲れ強さよりはるかに高い値を示し、中間に円環かく部を設けることは疲れ強さの向上にきわめて有効であることがわかる。

5. 結 言

円板と円筒との接合部に対する疲れ試験結果、次のことがわかった。

第21図 立体模型試験片の疲れき裂部